

Caracterización de los lixiviados producidos por el relleno sanitario de San Pedro La Laguna, Guatemala

Characterization of the leachate produced by the San Pedro La Laguna landfill, Guatemala

Jennifer Elizabeth López Velásquez¹ 

¹Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos,
Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala
Dirección para recibir correspondencia: ing.jennilopez@profesor.usac.edu.gt

Recibido: 10/01/2022 Aceptado: 20/05/2022

Resumen

En la cuenca del Lago de Atitlán en Guatemala, en específico en el departamento de Sololá, municipio de San Pedro la Laguna se construyó en el año 2016 un relleno sanitario para la disposición final de los desechos sólidos inorgánicos del municipio, el cual genera lixiviados cuyas características se desconocen, lo que ha impedido tomar medidas de control e implementar un tratamiento adecuado de los mismos. La presente investigación tuvo como finalidad evaluar el comportamiento de los lixiviados producidos por los desechos inorgánicos que se disponen en este relleno sanitario. Para ello se realizaron análisis durante la época seca y lluviosa de trece parámetros físicos y químicos, así como del volumen de lixiviados que se producen. Durante el estudio se evaluó la relación que existe entre las características fisicoquímicas del lixiviado y la precipitación que ingresa al relleno sanitario, quedando evidenciado que algunos parámetros como el cromo se incrementa en invierno pasando de un valor máximo en verano de 1.94 mg/l., a un máximo de 4.56 mg/l., en invierno, este comportamiento se repite en ocho de los parámetros evaluados en el estudio (demanda química de oxígeno, nitrógeno de amonio, fósforo total, ortofosfatos, alcalinidad, potasio, sodio y cromo). Con los resultados obtenidos se pudo determinar que el relleno sanitario genera un lixiviado considerado como joven. Este estudio podrá ser utilizado como referente para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios que produzcan lixiviados jóvenes y que reciban únicamente desechos inorgánicos dentro de la Cuenca del Lago de Atitlán.

Palabras claves: desechos sólidos inorgánicos, tratamiento de desechos sólidos, vertedero municipal, contaminación, cromo en lixiviados, sodio en lixiviados.

Abstract

In the Lake Atitlán's basin in Guatemala, specifically in the department of Sololá, town of San Pedro la Laguna, a sanitary landfill was built in 2016 for the final disposal of the municipality's inorganic solid waste. The landfill generates leachates whose characteristics are unknown; this condition has prevented taking control measures and implementing an adequate treatment of leachates. The purpose of this investigation was to evaluate the behavior of the leachate produced by the inorganic waste that is disposed in this landfill. To achieve this goal, test was carried out during the dry and rainy season of thirteen physical and chemical parameters, and the volume of leachate produced was measured. During the study, the relationship between the physicochemical characteristics of the leachate and the precipitation that falls over the landfill was evaluated, showing that some parameters in the leachate such as chromium increase in winter, passing from a maximum value in summer of 1.94 mg/l. to a maximum of 4.56 mg/l., during winter. This behavior is repeated in eight of the parameters evaluated in the study (chemical oxygen demand, ammonium nitrogen, total phosphorus, orthophosphates, alkalinity, potassium, sodium, and chromium). With the results obtained, it was possible to determine that the landfill generates a leachate considered young. This study may be used as a reference for the treatment of leachate from landfills that produce young leachate and receive only inorganic waste within the Lake Atitlán Basin.

Key words: inorganic waste, waste separation, waste treatment, municipal landfill, contamination, chromium in leachate, sodium in leachate.



Introducción

El municipio de San Pedro La Laguna ha realizado esfuerzos por llevar a cabo un proceso de manejo de los residuos sólidos de forma integral, separando estos desechos desde el hogar. Los desechos de los hogares se trasladan hacia una planta de tratamiento donde los residuos orgánicos se utilizan para la producción de abono, los reutilizables se comercializan y los inorgánicos no comercializables se disponen en un relleno sanitario.

Los lixiviados generados en este relleno sanitario son una fuente de contaminación que no cuenta con un tratamiento. Las autoridades municipales se encuentran interesadas en mejorar esta situación, sin embargo, carecen de estudios que permitan tomar una decisión en relación con el método de tratamiento o manejo que debe aplicarse a estos lixiviados, para lo cual es de suma importancia determinar su calidad y cantidad.

Para determinar las características fisicoquímicas del lixiviado generado en este relleno sanitario se realizó en el año 2018 un muestreo de este el cual sirvió de base para fundamentar el número de muestras que se utilizarían para el estudio.

Con el muestreo realizado en el año 2018, se definió la metodología del estudio ejecutado del año 2019 al 2020 el cual se realizó con el objetivo de determinar el comportamiento de la producción de lixiviados en la época de verano e invierno, y establecer como este cambio estacional puede afectar las características fisicoquímicas del mismo, y con base en ello se puedan implementar medidas de control para evitar que el lixiviado pueda generar contaminación en el área del relleno sanitario.

Antecedentes

En Guatemala la disposición final de desechos se realiza de distintas maneras, tales como: plantas de tratamiento de desechos sólidos, rellenos sanitarios, botaderos controlados y botaderos a cielo abierto. Los nombres designados a los mismos corresponden al diseño original, sin embargo, conforme a la operación de los sistemas la clasificación puede variar.

El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de Guatemala ha elaborado términos de referencia para

que se desarrolle una gestión integral de residuos y desechos sólidos comunes en el país. Dentro de estos se indica que debe existir un sistema para el tratamiento de lixiviados, el cual contemple: sistema de recolección, conducción, tratamiento y almacenamiento de lixiviados; tipo de impermeabilización; localización de pozos de monitoreo; manejo de lodos y sistema de emergencia ante fenómenos meteorológicos.

El municipio de San Pedro La Laguna pertenece al departamento de Sololá. Según el censo del Instituto Nacional de Estadística del año 2018 tenía una población urbana de 10,705 habitantes, sin población rural. La forma principal de eliminación de la basura de su población corresponde al servicio de extracción de desechos municipal con un 93%; un 0.04% tiene acceso a servicio privado de recolección y el resto tiran sus desechos en basureros clandestinos, la disponen en aboneras, la queman o entierran. El tren de aseo municipal recolecta en distintos días los desechos orgánicos, inorgánicos y reciclables. Por el servicio de extracción y disposición final de desechos se cobra Q 1.00 por costal el cual se paga en el momento de la extracción, lo que corresponde en promedio a Q 15.00 mensuales por usuario.

En el año 2015 se realizó la clausura del vertedero a cielo abierto que utilizaba la municipalidad, posteriormente en el 2016 se inauguró la planta de tratamiento actual y se indicó que su tiempo de vida útil sería de 10 años para una producción per cápita - PPC- de 0.25 kg/habitante/día, sin embargo, durante el primer año de operación se llegó al 50% de su capacidad.

En el año 2016 la organización ProAtitlán en conjunto con el Centro de Estudios y Cooperación Internacional –CECI- realizó un aporte importante a la cuenca en conjunto con las municipalidades, a través de la caracterización de los desechos sólidos en los municipios de la cuenca del lago de Atitlán. En el municipio de San Pedro La Laguna el estudio se realizó con 105 viviendas, obteniéndose como resultado una producción de desechos per cápita de 0.37 kg/habitante/día, de lo cual el 51.47% corresponde a los desechos orgánicos; el 3.46% a desechos reciclables y el 45.07% a desechos no reciclables.

La planta de tratamiento se encuentra circulada con un muro perimetral, cuenta con servicios de energía eléctrica y agua potable, adicionalmente se encuentra instalado un sistema de vigilancia por cámaras. La infraestructura se encuentra distribuida en oficina de recepción, piletas para separación de vidrios, bodega de almacenamiento de reciclables, área de clasificación de reciclables, área de compostaje, área para compactadoras, huerto demostrativo, relleno sanitario y pileta de lixiviados.

El relleno sanitario tiene una capacidad 6,986.10 metros cúbicos, en el cual no se realiza compactación para los residuos sólidos, sin embargo, se realiza compactación para el material que es enviado para su incineración. Debido a la falta de una clasificación adecuada por parte de la población, los trabajadores realizan una reclasificación para recuperar los reciclables. La cobertura de los residuos con suelo dejó de realizarse debido al acelerado llenado del relleno sanitario, el cual se encuentra al límite de su capacidad.

De acuerdo con el diseño inicial se instaló una geomembrana para la impermeabilización del piso y taludes del relleno sanitario, así mismo un sistema de drenaje para recolectar los lixiviados generados. Los lixiviados generados por los desechos orgánicos son reutilizados en el proceso de la elaboración del abono orgánico, mientras que los lixiviados del relleno sanitario, son dispuestos en una pileta ubicada en la parte baja de la planta de tratamiento.

Según la evaluación de la planta de tratamiento realizada por Rodríguez y Lenin (2019) en el período del año 2018 al 2019, ingresó a la planta un promedio de 10.93 ton/día de residuos, de los cuales el 37.18% (4.06 ton/día) eran desechos orgánicos; el 3.91% (0.43 ton/día) eran desechos reciclables y el 58.90% (6.44 ton/día) restante eran desechos no reutilizables los cuales se disponen en el relleno sanitario.

Metodología

fisicoquímica del lixiviado se consideró como fuente principal los datos típicos sobre la composición de los lixiviados procedentes de vertederos jóvenes y maduros, así como los parámetros de muestreo de los lixiviados establecidos por Tchobanoglous et al. (1997).

La representatividad de los parámetros que se debían evaluar longitudinalmente se realizó a través de un muestreo inicial, en el mes de julio del 2018, cuya muestra se trasladó al laboratorio donde se evaluaron un total de 24 parámetros. El resultado de esta evaluación se muestra en la tabla 1. En la fecha establecida no hubo precipitaciones ya que fue durante el período de la canícula en la región de la cuenca del Lago de Atitlán.

Tabla 1. Características de los lixiviados del relleno sanitario de San Pedro La Laguna, julio 2018

Parámetros Analizados	Resultados
Bario (mg/l)	N.D.
Cadmio Cd (mg/l)	N.D.
Calcio (Ca) (mg/l)	101.00
Cobre (Cu) (mg/l)	N.D.
Cromo (Cr) (mg/l)	0.46
Hierro (Fe) (mg/l)	6.03
Magnesio (Mg) (mg/l)	152.00
Manganeso (Mn) (mg/l)	0.22
Mercurio (Hg) (mg/l)	N.D.
Níquel (Ni) (mg/l)	N.D.
Plata (Ag) (mg/l)	N.D.
Plomo (Pb) (mg/l)	N.D.
Potasio (K) (mg/l)	1,542.00
Sodio (Na) (mg/l)	582.00
Zinc Zn (mg/l)	0.19
Demanda Química de Oxígeno (DQO) mg/l	2,246.00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) mg/l	1,140.00
Dureza Total (CaCO ₃) (mg/l)	878.00
Fosforo Total (P) (mg/l)	10.30
Nitratos (mg/l)	< 25
Potencial de Hidrogeno pH (unidades)	12.00
Solidos Suspendidos (mg/l)	34.00
Sulfatos (mg/l)	< 25
Alcalinidad Total (mg/l de CaCO ₃)	4,750.00
Nitrógeno de Amonio (mg/l)	178.00
Ortofosfatos (mg/l)	33.00

De acuerdo con los resultados obtenidos se realizó una comparación con los valores típicos y los rangos establecidos por Tchobanoglous et al. (1997). Se hizo un análisis de los datos obtenidos para determinar los más representativos para el desarrollo del estudio de la calidad de los lixiviados, para lo cual se descartaron aquellos que no fueron detectables y los que tuvieran

valores muy bajos acorde a los valores típicos presentes en los lixiviados, seleccionándose los parámetros siguientes:

1. Cromo
2. Hierro
3. Manganeso
4. Potasio
5. Sodio
6. Demanda Química de Oxígeno
7. Demanda Bioquímica de Oxígeno
8. Dureza total
9. Fosforo total
10. Potencial de Hidrógeno pH
11. Alcalinidad total
12. Nitrógeno de Amonio
13. Ortofosfatos

La recolección de las muestras utilizadas en este estudio se realizó durante el año 2019, cuyo análisis fue realizado por un laboratorio de análisis de agua residual privado que cuenta con 7 parámetros certificados con ISO/IEC17025.

Para determinar el volumen de lixiviados procedentes del relleno sanitario, se utilizó la pileta de acumulación de lixiviados. En esta se realizaron lecturas de la altura de agua y este valor se multiplicó por el área de la pileta, obteniéndose el volumen de lixiviados generados por diferencia de la altura anterior medida. Es importante indicar que el volumen total de la pileta de acumulación de lixiviados es de 16.64 metros cúbicos.

La estación meteorológica del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología Meteorología e Hidrología más cercana es la ubicada en el municipio de Santiago Atitlán, con coordenadas latitud 143754 y longitud 911353, teniendo esta estación registros históricos desde el año 1990.

Para determinar la precipitación y evaporación en el área del relleno sanitario, se utilizaron los datos del área del relleno sanitario y la precipitación y evaporación histórica registrada en la estación meteorológica de Santiago Atitlán.

Con el objetivo de contar con una muestra representativa se consideró relevante realizar el muestreo en época seca y época de lluvia, lo cual permitió relacionar las condiciones climáticas con las distintas concentraciones fisicoquímicas del lixiviado.

De acuerdo con los datos obtenidos en el estudio realizado por Espinosa et al. (2010), se obtuvo la desviación estándar de un muestreo con similares características, con base en ello el tamaño de la muestra quedó establecida en cuatro, sin embargo, tomando en cuenta que las mismas deben ser distribuidas en la época seca y lluviosa, se propuso incrementar 1 muestra para cada época, considerando una muestra con mayor representatividad, dando un tamaño de muestra de 6 unidades.

El período de muestreo se propuso iniciar en el mes de marzo del año 2019 con una periodicidad entre cada muestra de 2 semanas, considerando una semana adicional para que se tomara una posterior a la Semana Santa, la cual se considera una temporada de alta producción de desechos sólidos, ya que el municipio es altamente turístico.

Tomando en consideración la época de mayor cantidad de lluvias del año 2018, se propuso realizar los muestreos a partir del mes de septiembre del año 2019 posterior a la canícula de la región, realizando a su vez los muestreos con 2 semanas de diferencia.

Las muestras fueron recolectadas y transportadas de acuerdo con los procedimientos establecidos por el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2017), específicamente el método 1060 collection and preservation of samples.

Para la dilución de las muestras se utilizó la metodología del Standard Methods for Water and Wastewater (2017), método Espectrofotométricos; J.Fries/H. Getrost. E. Merck Darmstadt. 1977, método Organic Reagents for Trace Analysis y Merck y Hach método Fotométricos.

Resultados

Características físicas y químicas

Para identificar los cambios que se presentan en los valores de DBO₅ y DQO, se realizó una comparación entre el promedio obtenido en el año 2019, con los datos puntuales obtenidos en los años 2018 y 2020. La figura 1 muestra la variabilidad de los parámetros conforme los años mencionados.

Figura 1. Resultados de DBO₅ y DQO en los años 2,018 a 2,020 de los lixiviados del relleno sanitario

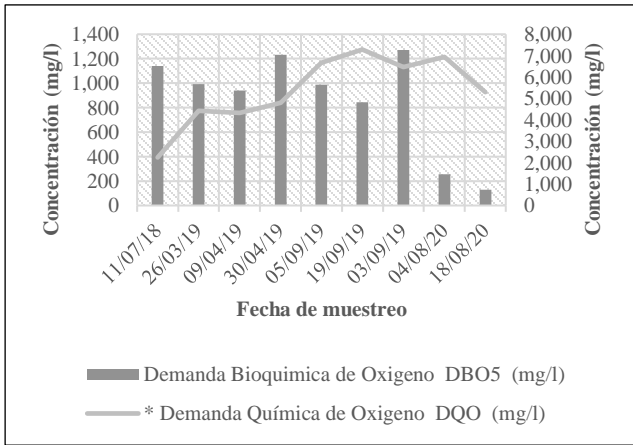
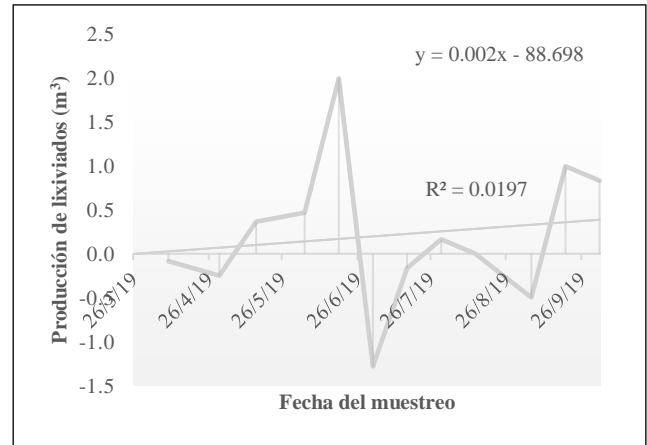


Figura 2. Producción de lixiviados en m³ y su regresión lineal



En la figura 2 se presenta la gráfica de producción de los lixiviados, así como su regresión lineal.

Con el objetivo de determinar las características físicas y químicas del lixiviado del relleno sanitario en época de verano e invierno se realizó un total de 6 muestras, en cada una de ellas se determinaron 13 parámetros. Los resultados obtenidos de este muestreo se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados del muestreo de los lixiviados del relleno sanitario de San Pedro La Laguna realizado en el año 2019

Parámetros analizados	unidad	Época seca				Época lluviosa	
		26/03	09/04	30/04	05/09	19/09	03/10
Demanda Bioquímica de Oxígeno ₅	(mg/l)	992.00	940.00	1,230.00	990.00	845.00	1,270.00
Demanda Química de Oxígeno	(mg/l)	4,415.00	4,332.00	4,807.00	6,673.00	7,285.00	6,459.00
Nitrógeno de Amonio	(mg/l)	630.00	575.00	580.00	1,055.00	900.00	720.00
Fosforo Total	(mg/l)	21.90	22.80	25.40	31.00	32.50	29.80
Ortofosfatos	(mg/l)	74.00	73.00	78.00	110.00	97.00	96.00
Alcalinidad Total	(mg/l de CaCO ₃)	6,355.00	6,806.00	7,256.00	8,032.00	8,357.00	8,057.00
Potencial de Hidrogeno (Laboratorio)	(u)	8.34	8.21.00	8.26	7.93	8.11	7.97
Dureza Total	(mg/l CaCO ₃)	1,075.00	1,050.00	1,075.00	1,050.00	950.00	800.00
Potasio	(mg/l)	1,439.00	1,416.00	1,330.00	1,943.00	1,636.00	1,414.00
Sodio	(mg/l)	1,338.00	1,358.00	1,342.00	1,792.00	1,684.00	1,694.00
Cromo	(mg/l)	1.50	1.44	1.94	3.57	4.56	3.29
Hierro	(mg/l)	11.30	10.90	13.50	7.07	13.55	12.34
Manganeso	(mg/l)	0.47	0.47	0.59	0.34	0.67	0.39

En la tabla 3 se muestran los resultados de los estadísticos aplicados a los parámetros fisicoquímicos

de las muestras extraídas del lixiviado del relleno sanitario.

Tabla 3. Comparativo de los estadísticos descriptivos de los parámetros físicos y químicos de los lixiviados del relleno sanitario con los datos típicos sobre la composición de los lixiviados.

Parámetro analizado	Media	Desviación estándar	Vertedero nuevo (menos de 2 años)		Vertedero maduro (mayor de 10 años)
			Rango	Típico	
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) (mg/l)	1,044.50	168.35	2,000 - 30,000	10,000	100 - 200
Demanda Química de Oxígeno(mg/l)	5,661.83	1292.01	3,000 - 60,000	18,000	80 - 160
Nitrógeno de Amonio (mg/l)	743.33	194.98	10 - 800	200	20 - 40
Fósforo Total(mg/l)	27.23	4.47	5 - 100	30	5 - 10
Ortofosfatos (mg/l)	88.00	15.17	4 - 80	20	4 - 8
Alcalinidad Total (mg/l de CaCO ₃)	7,477.17	797.09	1,000 - 10,000	3,000	200 - 1,000
Potencial de Hidrógeno (u)	8.14	0.16	4-5 - 7.5	6	6.6 - 7.5
Dureza total (mg/l CaCO ₃)	1,000.00	108.40	300 - 10,000	3,500	200- 500
Potasio (mg/l)	1,529.67	226.51	200 - 1,000	300	50 - 400
Sodio (mg/l)	1,534.67	210.20	200 - 2,500	500	100 - 400
Cromo (mg/l)	2.72	1.28			
Hierro (mg/l)	11.44	2.40	50 - 1,200	60	20 - 200
Manganeso (mg/l)	0.49	0.12			

Fuente: elaboración propia con información de Tchobanoglous et al. (1997)

Producción de lixiviados

La producción de los lixiviados se estimó a través de la medición del volumen generado en la pileta de disposición final del relleno sanitario. La toma inicial se realizó el 26 de marzo del 2019 cuya fecha coincidió con el primer muestreo, posteriormente se realizaron mediciones cada 15 días para determinar la producción de lixiviados hasta el 03 de octubre del mismo año, haciendo una totalidad de 13 muestreos. En la tabla 4 se presentan los datos obtenidos.

La precipitación acumulada de los meses de marzo a octubre se obtuvo de la estación automática de Santiago Atitlán, en la tabla 5 se muestra la precipitación acumulada calculada.

La tabla 5 se realizó considerando la precipitación acumulada que es captada por el área que ocupa el relleno sanitario y su correspondiente evaporación, así mismo se puede observar de forma gráfica en la figura 3, la dispersión existente de los datos.

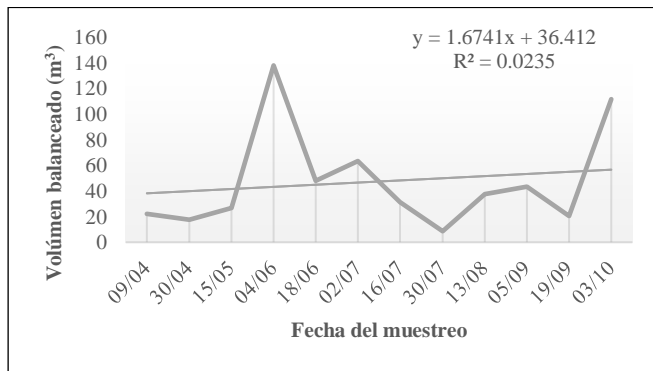
Tabla 4. Volumen de lixiviados del relleno sanitario de San Pedro La Laguna según muestreo realizado en el año 2019

Fecha	Volumen de la pileta de lixiviados (m ³)	Volumen de lixiviados generados (m ³)
26/03/2,019	11.98	
09/04/2,019	11.90	-0.08
30/04/2,019	11.65	-0.25
15/05/2,019	12.01	0.37
04/06/2,019	12.48	0.47
18/06/2,019	14.48	2.00
02/07/2,019	12.31	-1.28
16/07/2,019	12.15	-0.17
30/07/2,019	12.31	0.17
13/08/2,019	12.31	0.00
05/09/2,019	11.81	-0.50
19/09/2,019	12.81	1.00
03/10/2,019	13.64	0.83

Tabla 5. Precipitación acumulada mensual estación automática Santiago Atitlán para el año 2019

Mes	Precipitación en el relleno sanitario (mm)
Marzo	9.00
Abril	50.00
Mayo	170.00
Junio	173.00
Julio	50.00
Agosto	99.00
Septiembre	148.00
Octubre	255.00

Figura 3. Regresión lineal y gráfica de volumen balanceado de lixiviados del relleno sanitario



En la tabla 6 se muestra el resultado del balance hídrico realizado al relleno sanitario de San Pedro La Laguna, este se realizó utilizando la metodología propuesta por Vadillo y Carrasco, (2005), quien indica que los factores climáticos inciden en el relleno sanitario y en la pileta de lixiviados, así como en la producción de los lixiviados.

Efecto de la precipitación sobre las concentraciones físicas y químicas de los lixiviados.

En la figura 4 se presenta la significancia de las concentraciones físicas y químicas de los lixiviados en relación con la época de muestreo, así mismo en la figura 5 se muestra el valor de F de estas, con el objeto de mostrar el efecto de la precipitación en dichas concentraciones.

Para determinar el efecto que tiene la precipitación en las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos evaluados, se realizó un análisis de las varianzas (ANOVA) de los parámetros considerando la época de veranos e invierno. El resultado de este análisis se muestra en la tabla 7.

Tabla 6. Volumen balanceado del año 2019

Fecha	Volumen de lixiviados generados (m³)	Precipitación en el relleno sanitario (m³)	Volumen de evaporación en la pileta de lixiviados (m³)	Volumen balanceado (m³)
26/03/2,019				
09/04/2,019	-0.08	22.00	-0.01	21.91
30/04/2,019	-0.25	17.60	0.00	17.35
15/05/2,019	0.37	26.40	0.00	26.76
04/06/2,019	0.47	137.20	-0.01	137.66
18/06/2,019	2.00	46.00	-0.13	47.86
02/07/2,019	-1.28	64.40	-0.01	63.10
16/07/2,019	-0.17	31.60	-0.01	31.42
30/07/2,019	0.17	8.40	0.00	8.57
13/08/2,019	0.00	37.60	-0.01	37.59
05/09/2,019	-0.50	44.00	-0.03	43.47
19/09/2,019	1.00	19.60	-0.01	20.59
03/10/2,019	0.83	110.40	0.00	111.23

Tabla 6. Volumen balanceado del año 2019

Fecha	Volumen de lixiviados generados (m ³)	Precipitación en el relleno sanitario (m ³)	Volumen de evaporación en la pileta de lixiviados (m ³)	Volumen balanceado (m ³)
26/03/2,019				
09/04/2,019	-0.08	22.00	-0.01	21.91
30/04/2,019	-0.25	17.60	0.00	17.35
15/05/2,019	0.37	26.40	0.00	26.76
04/06/2,019	0.47	137.20	-0.01	137.66
18/06/2,019	2.00	46.00	-0.13	47.86
02/07/2,019	-1.28	64.40	-0.01	63.10
16/07/2,019	-0.17	31.60	-0.01	31.42
30/07/2,019	0.17	8.40	0.00	8.57
13/08/2,019	0.00	37.60	-0.01	37.59
05/09/2,019	-0.50	44.00	-0.03	43.47
19/09/2,019	1.00	19.60	-0.01	20.59
03/10/2,019	0.83	110.40	0.00	111.23

Figura 4. Significancia de las concentraciones de los lixiviados comparadas con la época de muestreo

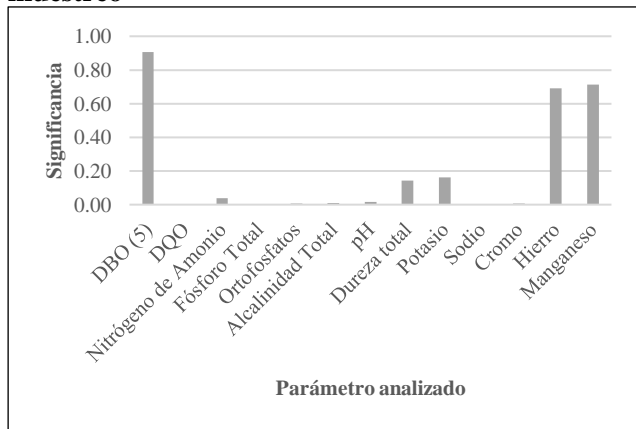


Figura 5. Valor de F de las concentraciones de los lixiviados comparadas con la época de muestreo

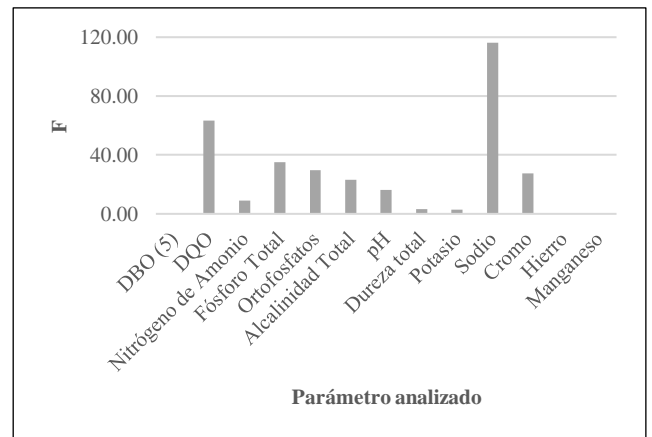


Tabla 7. ANOVA de los parámetros fisicoquímicos evaluados del lixiviado de San Pedro La Laguna

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Significancia
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5)	Entre grupos	542.00	1	542.00	0.02	0.91
	Dentro de grupos	141,166.00	4	35,292.00		
	Total	141,708.00	5			
Demanda Química de Oxígeno	Entre grupos	7,850,128.00	1	7,850,128.00	63.27	0.00
	Dentro de grupos	496,265.00	4	124,066.00		
	Total	8,346,393.00	5			
Nitrógeno de Amonio	Entre grupos	132,017.00	1	132,017.00	9.09	0.04
	Dentro de grupos	58,067.00	4	14,517.00		
	Total	190,083.00	5			
Fósforo Total	Entre grupos	90.00	1	90.00	34.95	0.00
	Dentro de grupos	10.00	4	2.60		
	Total	100.00	5			
Ortofosfatos	Entre grupos	1,014.00	1	1,014.00	29.82	0.01
	Dentro de grupos	136.00	4	34.00		
	Total	1,150.00	5			
Alcalinidad Total	Entre grupos	2,705,474.00	1	2,705,474.00	22.96	0.01
	Dentro de grupos	471,317.00	4	117,829.00		
	Total	3,176,791.00	5			
Potencial de Hidrógeno	Entre grupos	0.10	1	0.10	16.12	0.02
	Dentro de grupos	0.03	4	0.01		
	Total	0.10	5			
Dureza total	Entre grupos	26,667.00	1	26,667.00	3.32	0.14
	Dentro de grupos	32,083.00	4	8,020.00		
	Total	58,750.00	5			
Potasio	Entre grupos	108,811.00	1	108,811.00	2.95	0.16
	Dentro de grupos	147,727.00	4	36932.00		
	Total	256,537.00	5			
Sodio	Entre grupos	213,571.00	1	213,571.00	116.28	0.00
	Dentro de grupos	7,347.00	4	1,837.00		
	Total	220,917.00	5			
Cromo	Entre grupos	7.10	1	7.10	27.43	0.01
	Dentro de grupos	1.00	4	0.30		
	Total	8.20	5			
Hierro	Entre grupos	1.30	1	1.30	0.18	0.69
	Dentro de grupos	27.70	4	6.90		
	Total	28.90	5			
Manganeso	Entre grupos	0.00	1	0.00	0.15	0.71
	Dentro de grupos	0.07	4	0.02		
	Total	0.08	5			

Discusión de resultados

De acuerdo con Rivera et al. (2013) las características de los lixiviados están estrechamente relacionados a los desechos depositados en los rellenos sanitarios y al proceso de degradación que se lleva a cabo dentro del mismo, concluyendo que existe una relación entre la edad del lixiviado y las variaciones entre sus características, esto fue visible en este estudio al observar el comportamiento de los diversos parámetros evaluados, como la DBO₅ y DQO.

En la tabla 3, se presenta el valor medio de los parámetros físicos y químicos, los cuales fueron comparados con los datos típicos de los vertederos que presenta Tchobanoglous et al. (1997), para definir si corresponde a un vertedero joven o maduro. Los valores del DBO₅, DQO, nitrógeno de amonio, fósforo, ortofosfatos, alcalinidad, pH, dureza, potasio y sodio se encuentran dentro de los rangos o son más cercanos a los valores que corresponden a un lixiviado joven, es decir, el que se produce en un vertedero nuevo (menor de 2 años de operación).

La demanda bioquímica de oxígeno promedio del año 2019 obtenida en este estudio fue de 1,044.50 mg/l., cuyo valor es menor al registrado en el estudio realizado por Rivera et al. (2013) el que presenta un valor de DBO de 9,306-13,391mg/l para un vertedero joven. Sin embargo, al analizar el resultado del presente estudio y compararlo con los valores típicos para vertederos maduros, que según Tchobanoglous et al. (1997) es de 100 - 200 mg/l, el valor obtenido por Rivera et al. (2013) es superior (ver tabla 3). Tomando en cuenta los datos obtenidos en el presente estudio, la cantidad de oxígeno requerido para descomponer la materia orgánica es bajo, debido a que son desechos inorgánicos los dispuestos en el relleno sanitario en comparación con la caracterización realizada en el relleno sanitario del Valle del Cauca realizada por Rivera et al. (2013).

En la figura 1 se muestran las variaciones que tiene la DBO en el período del año 2018 al año 2020. En el año 2018 se obtuvo un valor de 1,140 mg/l., la media del año 2019 fue de 1,044.50 mg/l., y finalmente en el año 2020 un valor medio de 129.87 mg/l., lo cual refleja una reducción del 75 % con respecto a la media del año anterior. Según el estudio realizado por Espinosa et al. (2010), quien compara cuatro estudios de características de los lixiviados, se demuestra que estas

variaciones son comunes, ya que, de la comparativa, el rango más extremo corresponde a valores de 20 – 40,000 mg/l.

Los valores de la Demanda Química de Oxígeno fueron un 60 % más altos en el año 2018 comparado con la media del año 2019, mientras que la diferencia entre medias del año 2019 y del año 2020 corresponde a un 6%. La media del año 2019 es de 5,661.83 mg/l., mientras que el rango de la comparativa realizada por Espinosa et al. (2010) corresponde a valores de 500 – 60,000 mg/l., para la DQO, cuyo dato corresponde al mismo estudio del cual se tomó el dato de DBO.

El valor promedio de la relación DBO/DQO obtenido en el estudio se encuentra en el rango de 0.18 a 0.26. Este valor de la relación de DBO/DQO implica un dominio de la demanda química de oxígeno, dado que CEPIS (1991) indica que relaciones DBO/DQO por debajo de 0.40 significa una presencia mayoritaria de demanda química de oxígeno, por lo que no recomienda la aplicación de tratamiento biológico.

Por sus características el lixiviado se puede considerar de tipo inorgánico. Este aspecto puede confirmarse al evaluar el tipo de desecho sólido que se coloca en el relleno sanitario, el cual es de tipo inorgánico, dado que previo a la disposición de desechos en este relleno se realiza la separación de estos en orgánicos e inorgánicos, enviando al relleno solo los desechos clasificados como inorgánicos.

De acuerdo con Espinosa et al. (2010), la relación DBO₅/DQO promedio del relleno sanitario de la Habana, el cual no posee clasificación previa (separación de desechos orgánicos e inorgánicos) se ubica en un rango de 0.64 a 0.98, dominando en este tipo de rellenos sanitarios la presencia de la DBO₅ correspondiente a lixiviados de origen orgánico de forma mayoritaria, con lo cual se confirma que el lixiviado del relleno sanitario de San Pedro La Laguna es de origen inorgánico, dado que su relación como ya se indicó se ubicó en el rango de 0.18 a 0.26 con predominancia de la demanda química de oxígeno.

En relación con la concentración promedio de nitrógeno de amonio del lixiviado del relleno sanitario de San Pedro la laguna, este se encuentra dentro del rango de 10 a 800 mg/l., establecido por Tchobanoglous et al. (1997) como un rango normal para lixiviados jóvenes de rellenos sanitarios, así mismo, esta

concentración evidencia el proceso de descomposición bacteriana que existe dentro del relleno sanitario y el lixiviado propiamente.

De acuerdo con Tchobanoglous et al. (1997) el valor promedio de la concentración de fósforo total del lixiviado del relleno sanitario evaluado es muy cercano al valor típico de un lixiviado joven, el cual indica que no debe superar los 30 mg/l., mientras que el valor obtenido fue de 27.33 mg/l.

Los valores promedio de concentración de ortofosfatos obtenido en el estudio fue de 88.00 mg/l., el de potencial de hidrógeno de 8.14 unidades y de potasio de 1,529.67 mg/l., los cuales se encuentran por arriba de los rangos establecidos para lixiviados jóvenes por Tchobanoglous et al. (1997). Adicionalmente, se identificó la presencia de cromo 2.72 mg/l., para la cual no existe un valor típico.

En relación con el volumen de producción de lixiviados en el relleno sanitario, se obtuvo que este fue de 4.84 metros cúbicos durante las 24 semanas de duración de la investigación, con lo cual se obtiene una tasa de producción de 0.03 m³/d., de lixiviado para un área de 800 m² de relleno sanitario y con precipitación según se detalla en la tabla 2, y otras condiciones climáticas dentro de la Cuenca del lago de Atitlán.

La tasa de producción de lixiviados obtenida en este estudio es bastante inferior a datos proporcionados por Álvarez y Suárez (2006), quien indica que el relleno sanitario de El Guayabal en San José de Cúcuta, en Colombia, produjo durante los primeros tres años de vida un volumen de lixiviados en el rango de 6.91 a 17.28 m³/d., el cual no realiza la separación de desechos orgánicos e inorgánicos, con lo que se evidencia la importancia que tiene esta separación para reducir significativamente la producción de lixiviados en los rellenos sanitarios.

Durante los meses de abril, julio y septiembre, se pudo observar que en la pileta de lixiviados se redujo el volumen de lixiviados, llamando la atención este comportamiento principalmente en el mes de septiembre, dado que en este mes la precipitación alcanza un valor de 148 milímetros por lo que se asume algún proceso operativo de extracción de lixiviados que no fue reportado en el desarrollo del presente estudio. En cuanto al comportamiento observado en el mes de

abril, este puede deberse a evaporación de estos en la pileta de lixiviados.

Como ya se indicó los datos obtenidos el 02 de julio y el 05 de septiembre (ver tabla 4) se consideran anómalos, ya que el primero coincide con el traslado de lixiviados de la pileta a recipientes plásticos y el segundo no tiene relación con las condiciones climáticas.

Los valores más altos registrados de lixiviados corresponden a 1 y 2 m³ de lixiviados obtenidos el 19 de septiembre y 18 de junio, en este caso, dichos datos se encuentran relacionados con la proporción de precipitación, dado que en esos meses se presentan precipitaciones importantes en la región (173 milímetros en junio y 148 milímetros en septiembre, según tabla 5).

En la figura 2, se observa el comportamiento de producción los lixiviados, para lo cual se realizó un monitoreo durante 10 meses. En el mes septiembre se muestran valores negativos, los cuales coinciden con un incremento de la precipitación según la tabla 5.

De manera puntual el valor máximo del cálculo del volumen balanceado es de 137.7 m³ correspondiente al 04 de junio y el valor mínimo es de 8.6 m³ el 30 de julio. Así mismo, durante la época seca en el mes de abril se tuvo volumen acumulado de 39.25 m³; en el mes de junio se tuvo el mayor valor de 185.52 m³; y en el mes de julio el valor 39.98 m³ en el cual se registró una disminución de la precipitación, mes en el cual se registra el fenómeno de la canícula.

Se realizó la estimación del efecto que tiene la precipitación en las concentraciones tanto físicas como químicas, el cual se calculó a través de un ANOVA de los parámetros considerando las épocas de muestreo. La significancia mayor a 0.05 que corresponde a los datos de los parámetros de Demanda Bioquímica de Oxígeno, Dureza total, Potasio, Hierro y Manganeso indica que los mismos no están relacionados con la variable de la época de muestreo, por tanto, la precipitación no tiene efecto significativo en los mismos.

Es relevante mencionar que el presente estudio identificó que los parámetros de la Demanda Química de Oxígeno, Nitrógeno de Amonio, Fósforo total, Ortofosfatos, Alcalinidad total, Potencial de Hidrógeno, Sodio y Cromo presentan un alto valor de F y bajo de significancia, por tanto, se infiere que estas

variables si están relacionados con la variable de la época de muestreo, así mismo la precipitación tiene efecto en su concentración.

Alternativas propuestas para la mejora del tratamiento de los lixiviados

Según Giraldo (2001) al evaluar las posibles alternativas para el tratamiento de los lixiviados se debe considerar la calidad, evaluándolos según la categoría de lixiviado joven o maduro, en relación con la cantidad de años de operación que tenga el relleno sanitario; así como la cantidad que se producen para tomar en cuenta el espacio que se requiere para instalar el sistema de tratamiento.

Debido a las condiciones en las que se encuentra la planta de tratamiento y relleno sanitario actual se evaluaron propuestas que no requieren altos costos de mantenimiento y tecnología que no sea sostenible a largo plazo, asimismo, tomando en consideración que son líquidos de tipo inorgánico se descarta la posibilidad de un tratamiento biológico.

Con base en las tecnologías asequibles, se recomienda que la municipalidad tome en consideración las observaciones brindadas por Jaramillo (2002), que indican que es necesario evitar a toda costa la generación de lixiviado, pero si a pesar de todo se genera un poco, hay que mantenerlo dentro del relleno sanitario ya que su tratamiento es impracticable.

Por tanto, las propuestas para la mejora del tratamiento de los lixiviados generados por el relleno sanitario de San Pedro La Laguna son las siguientes:

- Adoptar medidas que minimicen la generación de lixiviados, evitando el contacto de la lluvia con los desechos depositados en el relleno sanitario; ya que el área de este es relativamente pequeña (20.00 x 40.00 m), se puede considerar la instalación de un techo que cubra esta área, o bien, colocar una geomembrana resistente a la degradación causada por los rayos ultravioleta (de manera fija en las secciones llenas y movable en las que aún se trabajan).
- La recirculación de los lixiviados, que se disponen en la pileta actualmente hacia el relleno sanitario.

Conclusiones

Las características físicas y químicas de los lixiviados del relleno sanitario de San Pedro La Laguna pudieron ser evaluadas durante las épocas de verano e invierno del año 2019 y 2020, las cuales mostraron alta variabilidad en sus concentraciones entre ambas épocas. De acuerdo con los valores obtenidos se concluye que el lixiviado se considera un lixiviado joven.

A su vez, estos datos permitieron hacer una comparativa con estudios realizados a nivel latinoamericano en condiciones similares, lo cual forma parte de una ruta para la correcta toma de decisiones para el tratamiento adecuado de los mismos. En este sentido, es importante resaltar que en el estudio desarrollado por Espinosa et al. (2010) el relleno sanitario incluye los desechos orgánicos dentro del mismo y en otros como el de Rivera et al. (2013) y Álvarez y Suárez (2006) esta información no se menciona, lo cual, si bien es una limitante, continúa siendo un importante referente.

La producción diaria de lixiviados se estima en 0.03 m³/d., para un área de relleno sanitario de 800 m² y en las condiciones climáticas del área de la cuenca del lago de Atitlán, cuando el relleno sanitario se destina para colocar los desechos inorgánicos no reutilizables.

Según el análisis del ANOVA que evaluó la relación de la concentración con las precipitaciones, se estableció que la misma influye en la concentración de ocho de los trece parámetros, siendo estos la demanda química de oxígeno, el nitrógeno de amonio, el fósforo total, los ortofosfatos, la alcalinidad total, el potencial de hidrógeno, el sodio y el cromo, en los cuales la precipitación tiene efecto en su concentración.

De acuerdo con los datos obtenidos en la investigación, la recirculación de los lixiviados al relleno sanitario se considera un método apropiado para el tratamiento de estos, adecuándose a las condiciones del territorio de San Pedro La Laguna.

Referencias

Álvarez, A., Suárez, J. (2006). Tratamiento biológico del lixiviado generado en el relleno sanitario "El Guayabal" de la ciudad San José de Cúcuta. Revista Ingeniería y Desarrollo. [En línea]. Núm.

20, julio-diciembre, pp. 95-105. ISSN: 0122-3461.

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente [CEPIS]. (1991). Manual de disposición de aguas residuales. Lima, Perú: McGraw-Hill.

Espinosa Lloréns, M. del C., López, M., Pellón, A., Robert, M., Diaz, S., González, A., Rodríguez, N., y Fernández, A. (2010). Análisis del comportamiento de los lixiviados generados en un vertedero de residuos sólidos municipales de la ciudad de la Habana. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. Vol.26, n.4, pp.313-325. ISSN 0188-4999.

Giraldo, E. (2001). Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios: Avances Recientes. *Revista de Ingeniería*. Vol.14, pp.44-55. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i14.538>.

Jaramillo, J. (2002). Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, Perú.

Rivera-Laguna, E., Barba-Ho, L.E., y Torres-Lozada, P. (2013). Determinación de la toxicidad de lixiviados provenientes de residuos sólidos urbanos mediante indicadores biológicos. *Revista Afinidad*. [En línea]. Vol. 70, Núm. 563.

Rodríguez A., y Lenin A. (2019). Evaluación del funcionamiento de la planta de tratamiento de residuos y desechos sólidos, diagnóstico y servicios en la DIGAM del municipio de San Pedro La Laguna, Sololá. [Trabajo de graduación de Ingeniería en Gestión Ambiental Local. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Guatemala.

Tchobanoglous, G., Theisen, H. y Vigil, S. (1997). *Gestión integral de residuos sólidos*. McGraw-Hill. México.

Vadillo, I., y Carrasco, F. (2005). Estimación del volumen de lixiviado generado en el vertedero de residuos sólidos urbanos de La Mina mediante balance hídrico. *Revista Geogaceta*. [En línea]. Vol. 37, pp. 139-142. ISSN:0213683X.